

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14246

研究課題名(和文)共鳴トンネルダイオードを用いたモノリシック集積テラヘルツ送受信デバイス

研究課題名(英文)Monolithic Integrated Terahertz Transceiver using Resonant Tunneling Diodes

研究代表者

鈴木 左文 (SUZUKI, SAFUMI)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：40550471

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で提案する共鳴トンネルダイオード(RTD)を用いたテラヘルツ(THz)送受信モノリシック集積回路に関して、増幅器の設計と実験的な基礎原理検証を行った。電磁界シミュレーションを用いた回路設計と、THz帯ベクトルネットワークアナライザによって抽出したRTDのTHz帯パラメータより増幅率を計算した。計算より1THz帯では0.4平方 $\mu\text{m}$ のRTDメサを集積することで約2dBの増幅度を有することが分かった。初期実験として、300GHz帯で増幅デバイスを作製し増幅率の測定を行ったが、寄生発振により増幅特性は得られなかった。そのため、この寄生発振を抑圧することでTHz増幅動作が可能と考えられる。

研究成果の概要(英文)：We proposed and designed a monolithic integrated terahertz (THz) transceiver using resonant tunneling diodes (RTDs), and investigated fundamental operation principle. We simulated the amplifier gain using electromagnetic simulation of the circuit and measured THz characteristics with THz vector network analyzer. From the simulation, we obtained an amplifier gain of  $\sim 2$  dB at around 1 THz range using RTDs with 0.4 square micron mesa. We fabricated the 300 GHz device for preliminary experiments. However, the amplification was not obtained because of parasitic oscillation with biasing circuit. THz amplification can be obtained by suppress the parasitic oscillation.

研究分野：テラヘルツエレクトロニクス

キーワード：テラヘルツ 増幅器

### 1. 研究開始当初の背景

光と電波の境界である、テラヘルツ(数100GHz~数THz)周波数帯は、化学・医療・バイオテクノロジーなどの分野で分析やイメージングなどや、また、大容量の無線通信などの非常に幅広い応用に用いられることが期待され、初期的ではあるが様々な応用のデモンストレーションが行われている。しかしながら、テラヘルツの増幅器には1THz以上を増幅する半導体増幅器は全く存在せず、それどころか、そのような高周波帯でデバイス特性を測定する装置もなかった。そのため、低出力のテラヘルツ出力を測定する場合、極低温の検出器を用いて検出する等の工夫をしなければならず、テラヘルツの利用は研究室レベルに留まっていた。現在このように、増幅器の欠如がテラヘルツアプリケーションを一般に広まるための大きな壁となっている。

THz 帯増幅器に関する研究は超高速のトランジスタを用いて行われているが、米国ノースラップグラマン社による1THz帯増幅器の報告が現在の最高周波数である。高周波になるに従い、トランジスタ微細化で増幅器1段当たりのゲインが1dB程度に非常に小さくなるため、複数段の増幅器を組み合わせなければならず、また、出力飽和も低い電力で起こってしまう。この様に、1-2THzのトランジスタ増幅動作は非常に困難な状況である。

### 2. 研究の目的

半導体デバイスの一つである共鳴トンネルダイオード(RTD)は、THz発振器として有力であり、現在、国内外で研究活動が活発になっている。素子は1V以下の低い駆動電圧で直流動作し非常に手軽なもので、我々はこれまでに共鳴トンネル現象を起こす量子構造や電子走行層の最適化、および、アンテナ構造の最適化により1.98THzの世界最高周波数の発振を達成している。また、開発した発振器を用いて44Gbpsのテラヘルツ無線通信などのデモンストレーションも行っている。

このように、RTDはこれまでの研究によって、約2THzの発振が達成されており、トランジスタの動作が困難な1~2THzの周波数帯において十分増幅可能なことが示されているため、増幅回路の素子として非常に有望である。通常2端子素子では入力と出力ポートが同一になるため、増幅動作を達成するのは困難と思われるが、ハイブリッドカップラを用いることにより、入出力分離が可能であり増幅動作が達成可能である。負性抵抗素子とハイブリッドカップラを用いた増幅器は以前より提案があったが、マイクロ波帯のみの動作で、ミリ波テラヘルツ帯での動作は行われていなかった。そのため、本研究では、RTDとハイブリッドカップラによる増幅器および発振器とアンテナを搭載したRTDに

よるテラヘルツ帯モノリシック集積回路を提案し、THz周波数域での増幅動作を達成する事を目標とし、RTD増幅器部分について重点的に研究を行った。

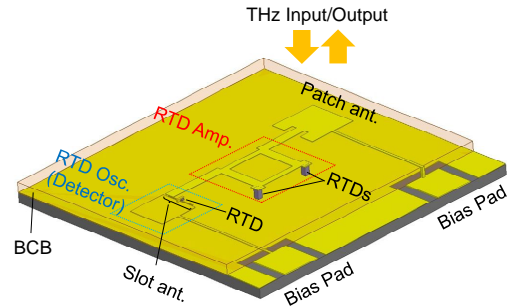


図1 RTDを用いたテラヘルツモノリシック集積回路

### 3. 研究の方法

図1に本研究で提案するRTD発振器(検出器)と増幅器、および、パッチアンテナを一体集積した構造を示す。青色の枠で囲まれた部分が発振器であり、発振器はInGaAs/AlAs 2重障壁RTDとスロットアンテナにより構成されている。スロットによる共振器とRTDの持つ微分負性抵抗により発振する。RTDへのバイアスはグランド電極の上にバイアス線路を這わせ供給する。スロットの直上にはマイクロストリップラインが形成され、スロットとマイクロストリップラインが磁界によって結合するため、発振したテラヘルツ波はマイクロストリップラインに入力される。赤枠で囲まれた部分がハイブリッドカップラとRTDで構成した増幅器である。低損失な誘電体であるBCBの上にマイクロストリップラインで形成された90°ハイブリッドカップラがあり、図中・が4つのポートに相当する。・のポートにRTDが集積され、残りの・はRTD発振器にはアンテナに接続されている。この時、RTDによる反射係数を $\Gamma$ とすると、 $S_{41}$ は $\Gamma$ と表される。 $\Gamma = (Z_{RTD} - Z_0) / (Z_{RTD} + Z_0)$  ( $Z_0$ は線路のインピーダンス)であるので、 $\text{Re}(Z_{RTD})$ が負かつ $\text{Im}(Z_{RTD})$ が十分小さければ、 $|\Gamma| > 1$ となり増幅動作となる。増幅されたテラヘルツ波はその後パッチアンテナによって大気中に放射され、放射された電力はショットキーバリアダイオードミキサによってダウンコンバージョンされ測定される。増幅器に使用されているRTDへのバイアスはパッチアンテナから伸びたラインによって行う。本研究では、本構造の中核である、RTD増幅器部分について、重点的に研究を行った。

まず、オンウエハプローブ測定より、増幅に必要な負性抵抗特性をTHz帯で正確に測定し、これを元に増幅器の設計を行う。ハイブリッドカップラ部分については、電磁界シミュレーターにより特性を明らかにし、直接

測定した負性抵抗特性と合わせて、THz 帯の増幅率を見積もる。最後に、以上の設計を用いてデバイス作製を行い、増幅器の増幅率を測定する。

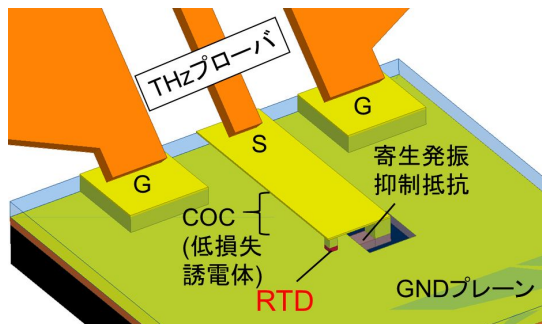


図2 RTDのTHz帯負性抵抗特性を抽出するための評価用デバイス模式図

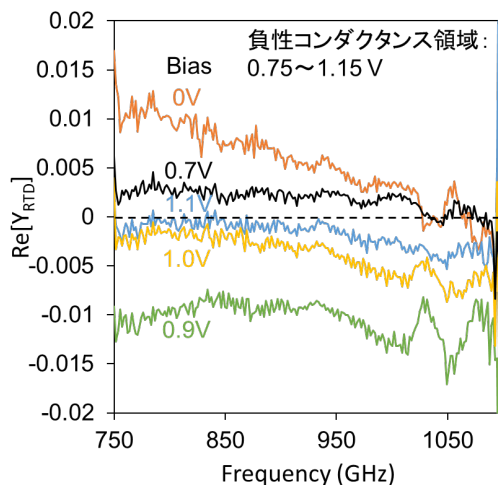


図3 RTDのTHz帯負性抵抗特性

#### 4. 研究成果

まず、RTD増幅器の設計に必要なRTDの負性抵抗(負性コンダクタンス)特性をオンウエハ測定により抽出した。RTDは微分負性抵抗特性を持つ素子であり、負性抵抗領域は通常の測定器で測ることはできず、また、THz帯で動作する測定装置が無かったため正確なRTDのインピーダンス測定は今まで全く行われていなかった。そのため、RTDのインピーダンスを正確に測定する方法として、RTDの数ミクロン真横に並列にn+InGaAsでできた抵抗を集積した負性抵抗を打ち消す構造(図2)を作製した。デバイス作製において、テラヘルツ帯での低損失誘電体であるCOC(Cyclic Olefin Copolymer)を新たに導入する必要があったため、COCの形成プロセスについて開発も行った。さらにTHz帯のベクトルネットワークアナライザ(750-1100GHz)でSパラメータをオンウエハ測定し、RTDの

パラメータを抜き出すため、異なるデバイスパターンを使ったディエンベディング手法を利用している。

図3に測定し抽出したRTDアドミッタンスの実部を示す。RTDと並列に抵抗が付いているため、並列抵抗だけの構造も作製・測定しておき、その測定結果の差分より抽出している。測定より、RTDのバイアス電圧を変化させ、RTD負性コンダクタンス領域の中心付近の0.9Vで確かに負性コンダクタンスの値が最大となっており、直接測定に成功した。

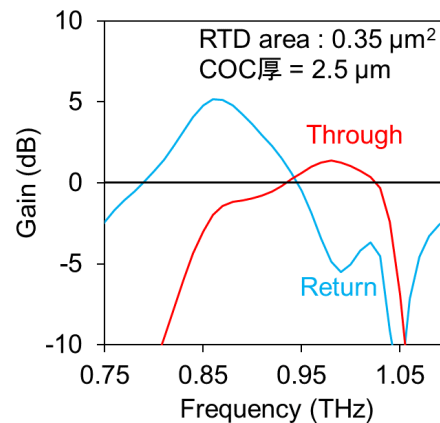


図4 高い負性コンダクタンスを有するRTDを用いた時の増幅率

以上の測定より、THz帯での負性抵抗の値が算出されたため、この値を用いて、増幅器の設計を行った。まず、電磁界シミュレーターを用いることで90°ハイブリッド回路の特性を計算し、RTDでの反射係数と合わせることで、RTD増幅器の増幅率を導出した。次に、測定した750-1100GHzにおけるRTDのコンダクタンスを組み合わせることで、1THz向けに設計した増幅器の増幅率の見積りを行ったところ、回路の損失によって増幅率が非常に小さいことが明らかになった。測定素子より $G_{RTD}$ が大きいRTDを用いることを考え、直流の電流密度-電圧特性の比較からそのRTDのTHzにおけるパラメータを見積った。その結果から増幅率の計算を行ったところ(図4)1THzにおいて約2dBの増幅が見積もられた。以上より、このRTDを用いることでRTD増幅器が実現可能であることが分かった。また、同時に測定の比較的容易な300GHz帯のデバイス設計も行い、同様に増幅動作が可能なることを確かめた。

デバイス作製には厚いCOCを形成する必要があったため、次に、作製プロセスの開発を行った。COCについて条件出しを行い、リフトオフや頭出しプロセスを確立した。デバイス作製プロセスは以下の通りである。まず、RTDメサの電極を真空蒸着によって形成し、それをマスクとしてウェットエッチングによってRTDメサを形成する。次に、グランド

プレーンとなる電極を形成し、その後、COCをスピンコーティングにより塗布し、焼成してCOC膜を形成する。ドライエッチングにより、COCをRTDメサ電極が出てくるまでエッチバックし、メサ電極の上に追加蒸着を行うことで、電極の柱を形成する。COCの塗布焼成を繰り返して行い、厚膜のCOCを形成すると共に金属柱を埋め込んだ後、柱の頭部が露出するように部分的なドライエッチングを行う。最後に、マイクロストリップラインの電極を形成して完成となる。作製したデバイスを図5に示す。まず、初期的な実験として、測定のし易い300GHz帯のものを作製した。

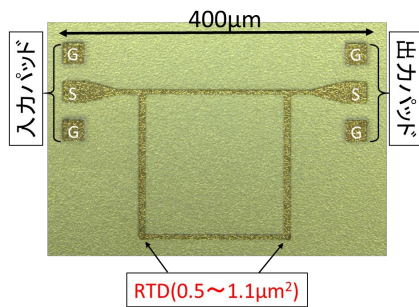


図5 作製した300GHz帯RTD増幅デバイス

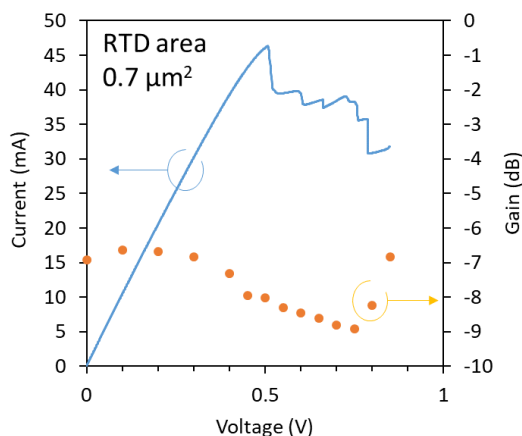


図6 作製したRTDのIV特性と300GHz帯の増幅率バイアス依存性

作製したデバイスをTHz帯ベクトルネットワークアナライザを用いたオンウエハ測定によって行い、増幅率を測定した。実測したRTDのIV特性と共に、300GHz帯の増幅率のバイアス依存性を図6に示す。明瞭な負性抵抗特性が0.5-0.8V付近で得られたが、増幅率はおよそ-8dBと増幅動作には至らなかった。これは負性抵抗領域にバイアスしたときに、外部電源回路との寄生発振が引き起こり、それによって増幅動作が妨げられたと考えられる。この寄生発振は、RTD発振器と同様に、RTDと並列接続されるように抵抗を同一基板内に集積することで防げ、そのようなデバイスによりTHz増幅動作が達成可能である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

- [1] Y. Takida, K. Nawata, S. Suzuki, M. Asada, and H. Minamide, "Terahertz-wave differential detection based on simultaneous dual-wavelength up-conversion", AIP ADVANCES vol. 7, 035020, 2017. DOI: 10.1063/1.4979405. (査読有)
- [2] S. Kitagawa, K. Ogino, S. Suzuki, and M. Asada, "Wide frequency tuning in resonant-tunneling-diode terahertz oscillator using forward-biased varactor diode", Japanese Journal of Applied Physics vol. 56, 040301, 2017. DOI: 10.7567/JJAP.56.040301. (査読有)
- [3] Y. Takida, K. Nawata, S. Suzuki, M. Asada, and H. Minamide, "Nonlinear optical detection of terahertz-wave radiation from resonant tunneling diodes", OPTICS EXPRESS, vol. 25, No. 5, pp. 5389-5395, 2017. DOI: 10.1364/OE.25.005389. (査読有)
- [4] K. Murano, I. Watanabe, A. Kasamatsu, S. Suzuki, M. Asada, W. Withayachumnankul, T. Tanaka, and Y. Monnai, "Low-Profile Terahertz Radar Based on Broadband Leaky-Wave Beam Steering", IEEE Trans. THz Sci. Technol. vol. 7, No. 1, pp. 60-69, Jan. 2017. DOI: 10.1109/TTHZ.2016.2624514. (査読有)
- [5] S. Kitagawa, M. Mizuno, S. Saito, K. Ogino, S. Suzuki, and M. Asada, "Frequency-tunable resonant-tunneling-diode terahertz oscillators applied to absorbance measurement" Jpn. J. Appl. Phys. vol. 56, 058002, 2017. DOI: 10.7567/JJAP.56.058002. (査読有)
- [6] N. Oshima, K. Hashimoto, S. Suzuki, and M. Asada, "Terahertz Wireless Data Transmission With Frequency and Polarization Division Multiplexing Using Resonant-Tunneling-Diode Oscillators", IEEE Trans. THz Sci. Technol., vol. 7, no. 5, pp. 593-598, 2017. DOI: 10.1109/TTHZ.2017.2720470. (査読有)
- [7] M. Asada, S. Suzuki, and T. Fukuma, "Measurements of temperature characteristics and estimation of terahertz negative differential conductance in resonant-tunneling-diode oscillators", AIP Advances, vol. 7, 115226, 2017. DOI: 10.1063/1.4979405. (査読有)

- [8] K. Ogino, S. Suzuki, M. Asada, "Spectral Narrowing of a Varactor-Integrated Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator by Phase-Locked Loop", J. Infrared Millimeter Terahz Waves, vol. 38, pp.1477-1486, 2017. DOI: 10.1007/s10762-017-0439-1. (査読有)
- [9] K. Ogino, S. Suzuki, and M. Asada, "Phase Locking and Frequency Tuning of Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillators", IEICE Trans. Electron., Vol. E101-C, no. 3, pp. 183-185, 2018. DOI: 10.1587/transele.E101.C.183. (査読有)

〔学会発表〕(計 12 件)

- [1] A. K. Dal Bosco, S. Suzuki, M. Asada and H. Minamide, "Study on nonlinear dynamics in Resonant Tunneling Diodes (RTD): unlocking dynamical diversity for THz devices applications", Optical Terahertz Science and Technology (OTST), PS1-14, London, April 3, 2017.
- [2] S. Sasaki, S. Suzuki and M. Asada, "Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillators Integrated with Broadband Bow-tie Antenna", Compound Semiconductor Week (CSW), P2.31, Berlin, May 16, 2017.
- [3] S. Fukuma, S. Suzuki and M. Asada, "Proposal and Gain Estimation of Terahertz Amplifier Using Resonant Tunneling Diodes with 90 Degree Hybrid Coupler", Compound Semiconductor Week (CSW), P2.36, Berlin, May 16, 2017.
- [4] A. K. Dal Bosco, S. Suzuki, M. Asada and H. Minamide, "High-frequency oscillations in a resonant tunneling diode with optical feedback", International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA), P-1, Okayama, Nov. 20, 2017.
- [5] D. Horikawa, N. Oshima, S. Suzuki, and M. Asada, "Wireless Data Transmission using Circularly-Polarized Wave Generated by Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator Integrated with Radial Line Slot Antennas", International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA), P-26, Okayama, Nov. 20, 2017.
- [6] N. Oshima, K. Hashimoto, S. Suzuki, and M. Asada, "Terahertz Wireless Data Transmission with Frequency and Polarization Division Multiplexing Using Resonant-Tunneling-Diode

Oscillators", European Conference on Antennas and Propagation F-A06, Palais des congres, Paris, March 23, 2017.

- [7] Y. Takida, K. Nawata, S. Suzuki, M. Asada, and H. Minamide, "Simultaneous Nonlinear Up-Conversion of Dual-Frequency Terahertz-Wave Radiation", Nonlinear Optics (NLO) 2017, NTu2A.5, Waikoloa, HI, USA, July 18, 2017.
- [8] Y. Takida, K. Nawata, S. Suzuki, M. Asada, and H. Minamide, "Nonlinear optical detection of terahertz-wave radiation from resonant-tunneling-diode oscillators," Conference on Lasers and Electro-Optics - European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2017), CC-3.6, Munich, June 25, 2017.
- [9] K. Ogino, S. Suzuki, and M. Asada, "Phase Locking of Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator Using Bias-Dependent Oscillation Frequency", Congress of International Commission for Optics, Tu2G-04, Tokyo, Aug 22, 2017.
- [10] R. Izumi, S. Suzuki, and M. Asada, "1.98 THz Resonant-Tunneling-Diode Oscillator with Reduced Conduction Loss by Thick Antenna Electrode", International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), MA3.1, Cancun, Mexico, Aug. 28, 2017.
- [11] K. Murano, S. Fukuma, S. Suzuki, M. Asada, W. Withayachumankul, T. Tanaka, and Y. Monnai, "Design of Terahertz Leaky-Wave Antenna Driven by Resonant-Tunneling Diode", International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), MA3.2, Cancun, Mexico, Aug. 28, 2017.
- [12] K. Ogino, S. Suzuki, and M. Asada, "Phase Locking of Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillators", International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), MA3.3, Cancun, Mexico, Aug. 28, 2017.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等  
[www.pe.titech.ac.jp/SuzukiLab/](http://www.pe.titech.ac.jp/SuzukiLab/)

#### 6．研究組織

(1)鈴木 左文 (SUZUKI, Safumi)  
東京工業大学・工学院・准教授  
研究者番号：40550471